

## 鋼のスラブ連続鑄造における鑄型内溶鋼流動制御に関する研究

著者	久保田 淳
号	2674
発行年	2000
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7947">http://hdl.handle.net/10097/7947</a>

氏名	くぼ た じゅん
授与学位	久 保 田 淳
学位授与年月日	博士（工学）
学位授与の根拠法規	平成13年3月26日
研究科，専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）金属工学専攻
指導教官	鋼のスラブ連続铸造における铸型内溶鋼流動制御に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 谷口尚司
	東北大学教授 日野光元
	東北大学教授 溝口庄三

## 論文内容要旨

### 1. 緒言

近年，鋼のスラブ連続铸造は日本国内のメーカーを中心として铸造速度の高速化が行われ， $2\text{ m/min}$  を超える連続铸造機が出現した。その結果，単位時間当りの铸造量は倍増し，生産性は飛躍的に向上した。しかし，铸片を圧延した薄板製品の表面に生じる線状疵欠陥の発生頻度が，従来の低速铸造の場合と比較して高速铸造の場合は倍増するという新たな問題が生じた。これらの線状疵は鋼片の表層部に非金属介在物があることにより生じる。この介在物を種類別に調べた結果，高速铸造铸片では铸型と凝固シェルとの潤滑剤であるモールドパウダーの占める割合が非常に多いことがわかった。これは従来の低速铸造では見られなかった特徴である。

そこで，本研究では，この高速铸造時のモールドパウダーを介在物とした製品表面欠陥の発生を防止するための技術開発を行うことを目的とした。実際には，まずモールドパウダーの溶鋼中への巻込み機構を推定し，モールドパウダー介在物の発生防止の考え方を整理した。そしてそれに基づいた铸型内溶鋼流動の測定・制御技術についての研究開発を行った。このうち，流動測定技術としては，铸型内の溶鋼表面流速を間接推定または直接測定の両方を開発目標とした。また流動の制御技術としては主に移動磁場を用いた電磁力による制御法の開発を行うとともに，铸型内での左右偏流を生じない溶鋼注入方法についての検討も行った。

### 2. モールドパウダーの巻込み機構と防止策の考え方

溶鋼中へのモールドパウダーの巻込み機構としては，図1に示すような4つの機構が考えられる。このうち高速铸造時は図1(a)に示した2つの機構が顕著となると考えられる。1つには铸型内の溶鋼は湯面に平行な流れをもつので，溶鋼とモールドパウダー溶融スラグとの界面が不安定になり巻込み現象が生じると考えられる。この現象は Kelvin-Helmholtz 不安定として知られている物理現象であり，この系では溶鋼の流速（以下，溶鋼表面流速と呼ぶ）が  $0.48\text{ m/s}$  を超えると界面不安定が生じることがわかった。もう1つは縦渦による巻込みであり，左右短辺側から浸漬ノズルへ向う溶鋼表面流が交叉する場合に生じる。この巻込みも溶鋼表面流速が  $0.32\text{ m/s}$  を超えると生じることが水モデルで確認されている<sup>1)</sup>。このようにこれら2つの巻込み機構とも，溶鋼表面流速が臨界値に達すると生じる。したがって高速铸造時のモールドパウダー溶融ス

ラグの巻込みを防止するには溶鋼表面流速を制御して巻込み臨界値以下とすればよいことがわかる。

### 3. 溶鋼表面流速の測定・推定方法

溶鋼表面流速の直接測定方法としては、Mo-ZrO<sub>2</sub> サーマット製の棒の先端部を溶鋼へ浸漬し、棒が溶鋼流から受ける力を棒の傾角で読取る方法、あるいは棒に取付けたロードセルで読取る方法を開発した。これらの方法は試験時には極めて有効であるが、耐久性などの点から通常の実機作業時の監視用としては適さない。そこで、鑄型内溶鋼に非接触で溶鋼表面流速を推定する方法も開発した。図2に示すように、鑄型短辺近傍の湯面には、浸漬ノズルからの吐出流が形成する循環流が湧昇流となって現れる。そこで鑄型短辺近傍の湯面変位から、溶鋼流速に関連のある特性値を抽出することを考えた。水モデル実験の結果、鑄型短辺近傍湯面変位は湯面の調和振動に起因する1Hz前後の変動の他に、0.1Hz前後の特徴的な変動（以下、長周期波と呼ぶ）が含まれていることがわかった。そしてこの長周期波の振幅は、図2に示すように水面直下流速と比例していることがわかった。実機では非接触の渦流式湯面レベル計が実用化されているので、この比例関係を用いて溶鋼表面流速を推定することが可能である。また鑄型短辺近傍湯面変位の長周期波振幅と、前述の湧昇流の運動量を鑄造条件から見積もるための指数であるF値

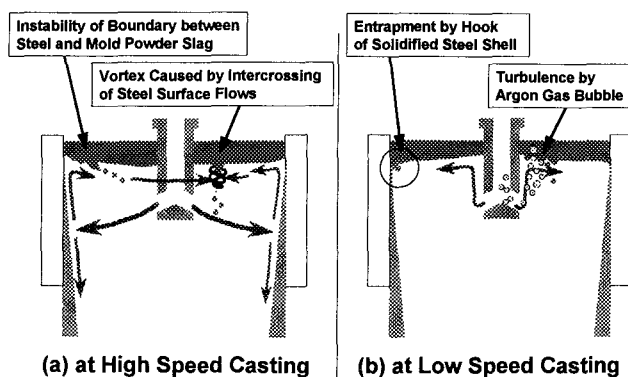


図1 モールドパウダー溶融スラグの溶鋼中への巻込みの推定機構 (a)高速鑄造の場合 (b)低速鑄造の場合

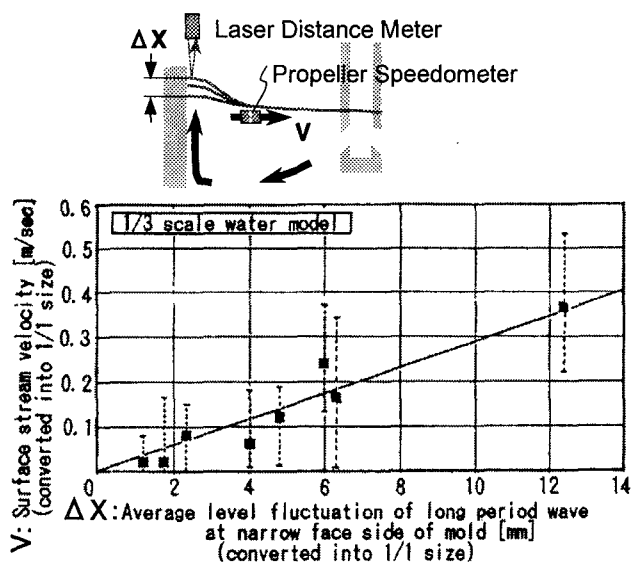


図2 鑄型短辺近傍湯面変位の長周期波振幅と水面直下流速の関係(1/3スケール鑄型水モデル)

<sup>3)</sup>の間にも比例関係のあることがわかっている。したがってF値を計算することにより、溶鋼表面流速を机上で推定することも可能となった。なお水モデル実験によれば、鑄型短辺近傍湯面変位にみられた長周期波は浸漬ノズルの吐出流速にも存在しており、起源は浸漬ノズルの内部の流動変化にあるものと考えられる。

### 4. 電磁力を用いた鑄型内溶鋼流動制御

2.で述べたように高速鑄造時のモールドパウダー溶融スラグの巻込みを防止するには、鑄型内の溶鋼表面流速を巻込み臨界流速以下に抑制すればよい。溶鋼表面流速の調節は、鑄造速度、浸漬ノズルの吐出角度および浸漬深さ、鑄型断面サイズ、Arガス等の操業パラメータの変更によっても可能である。しかしこれらのパラメータは連鑄機の生産性や製品の注文仕様など決まり、鑄型内溶鋼流動制御上の要件を優先させることは難しい。そこでこのような制約を受けずに鑄型内溶鋼流動を制御可能な手段として、新たに電磁力を採用した。図3は本研究で用いた移動磁場による電磁力制御の概念図である。(a)は浸漬ノズルの吐出流を制動する方向に磁場を移動させるEMLS (Electromagnetic Level Stabilizer)、(b)は吐出流を加速する方向に

磁場を移動させる EMLA (Electromagnetic Level Accelerator)である。溶鋼表面流速の減速には EMLS を用いる。

EMLS を印加した場合の、短辺と浸漬ノズル（図中 SEN と略記）間の midpoint 位置での溶鋼表面流速の変化を図 4 に示す。投入電流の増大とともに流速は減少して 0 となり、さらに逆方向の流速が増大している。また Ishii ら<sup>2)</sup> による数値電磁流体シミュレーションの結果を図 5 に示す。両図から EMLS を印加した場合には溶鋼表面流速が減速されるとともに浸漬ノズル付近には逆向きの溶鋼表面流が生じていることがわかる。この逆向きの溶鋼表面流は、EMLS の移動磁場が鋳型内溶鋼を駆動した結果生じたものと推定される。

したがって EMLS による溶鋼表面流の減速効果は、吐出流に対する磁場の直接の電磁制動力と、EMLS によって生じた逆向きの表面流が、本来の溶鋼表面流と干渉して減速する 2 つの効果の積と考えられ、次式で表されることがわかった。

$$R = 1 - \beta \cdot \frac{B^4}{v_0} \quad (1)$$

ここで R : EMLS 印加後の溶鋼表面流速と印加前の流速の比,  $\beta$  : 係数, B : EMLS の磁束密度(T),  $v_0$  : 浸漬ノズルの吐出流速(m/s)である。したがって実機の流速測定で  $\beta$  を、水モデルで  $v_0$  を求めることにより、実操業で必要な EMLS の大きさを (1) 式を用いて机上計算により求めることが可能となった。

## 5. 浸漬ノズル・スライディングノズル構造による吐出流の左右偏流防止

溶鋼表面流速が浸漬ノズルの左右で大きく異なる場合には、2. で述べた縦渦によるモールドパウダー溶融スラグの巻込みがより生じやすくなる。スライディングノズルや浸漬ノズルなどタンディッシュから鋳型へ溶鋼を注入する管路の形状は、左右偏流の発生に大きく影響することが知られている。本研究では従来研究例の少ない左右偏流の時系列ゆらぎの大きさの評価に重点をおいて、水モデルによる調査を行なった。

図 6 は異なる形状の内底をもつ 2 種類の浸漬ノズルについて、左右の吐出流速プロットの時系列軌跡を示

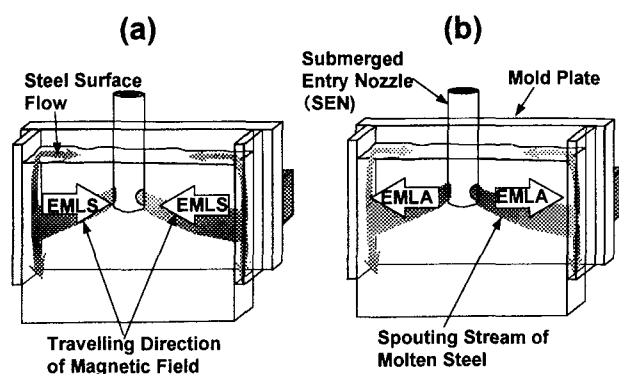


図3 移動磁場式鋳型内溶鋼流動制御装置の2種類の磁場移動モード (a)EMLS (b)EMLA

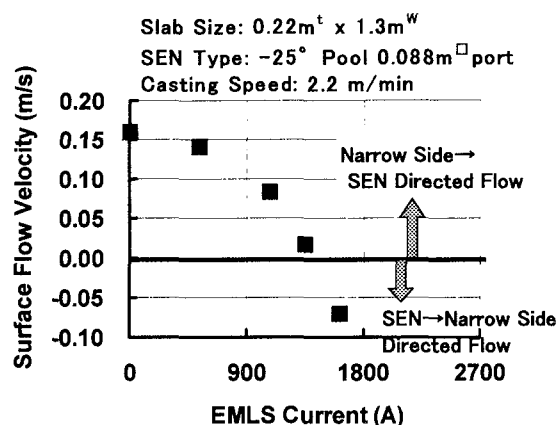


図4 EMLS の投入電流と傾角測定法で測定した溶鋼表面流の流速・向きとの関係

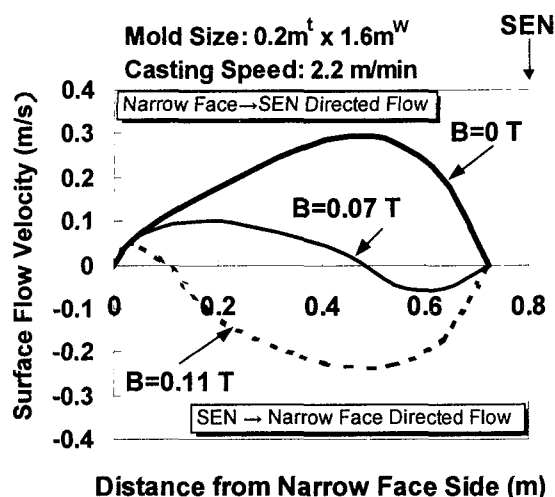


図5 数値電磁流体シミュレーションで求めた EMLS 印加による鋳型幅方向溶鋼表面流速プロファイルの変化 (Ishii ら<sup>65)</sup>)

したものである。山形内底ノズルではほぼ左右均等の吐出流速であるが、プール形内底ノズルでは左右均等で流れる期間と、大きな左右偏流を伴う期間が存在することがわかった。このように、左右偏流の観点からは山形内底の浸漬ノズルが優れている。しかしプール形内底ノズルでの左右偏流は、鑄型厚み方向開閉3層形スライディングノズルを使用することでかなり改善されることもわかった。また浸漬ノズルの形状は左右偏流の他に、ノズル内壁へのアルミナの付着しやすさや吐出流速の大きさに影響する。したがって浸漬ノズルの形状は、要求される連々鑄長さや、電磁力など他の鑄型内溶鋼流動制御手段の有無などを総合して選択するべきである。

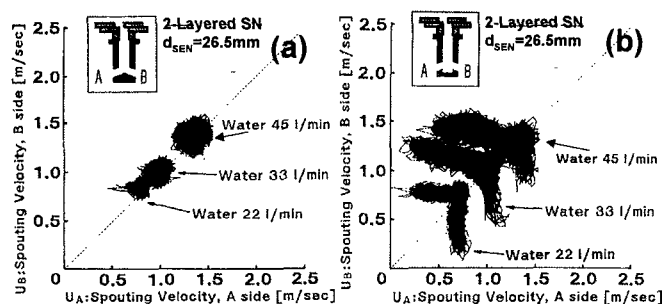


図6 水モデルでプロペラ流速計を用いて測定した浸漬ノズル左右吐出口の流速プロットの軌跡図（鑄型幅方向開閉2層形スライディングノズルを使用）(a)浸漬ノズルの内底が山形の場合 (b)浸漬ノズルの内底がプール形の場合

## 6. 鑄型内溶鋼流動制御による鑄片の品質制御

以上で述べた要素技術をもとに、モールドパウダー溶融スラグの巻込みを防止するための鑄型内溶鋼流動制御システムの構築を行った。図6には実機で EMLS, EMLA を自動制御するためのフロー図を示す。鑄造条件は5秒毎に収集されF値が計算される。このF値をあらかじめ設定された EMLS, EMLA の印加電流の設定値マスターに照合し、EMLS, EMLA の選択と電流値の設定が行なわれる。このシステムの運用により薄板冷延材の不合格率は従来の1/6に減少した。

さらに EMLS 印加時において、最も製品の不合格率が小さくなる条件での鑄型内溶鋼流動について検討した。その結果、溶鋼表面流速が極小となっており、EMLS の作用によって湯面へ向う上昇流が長辺銅板に沿って形成されていることがわかった。これにより2. で挙げたいずれのパウダー巻込み機構も効果的に抑制されているものと考えられる。

## 7. 結言

鋼のスラブ連続鑄造の高速化により生じた、モールドパウダー溶融スラグを介在物とした製品表面欠陥を低減することを目的に、鑄型内溶鋼流動の推定技術、および移動磁場を用いた溶鋼流動制御技術の研究開発を行なった。これらの技術により、製品品質の平均レベルは大幅に向上した。今後は、より精度の高い流動制御を行うために、鑄型内溶鋼流動のセンシングを充実させ、その情報を制御装置へフィードバックするシステムの開発が課題である。

## 参考文献

- 1)山岡ら：学振 19 委員会 鋼中非金属介在物委員会(1993)
- 2)T.Ishii et al: Ironmaking and Steelmaking, 23(1996), 267
- 3)手嶋ら：鉄と鋼, 79(1993), 576

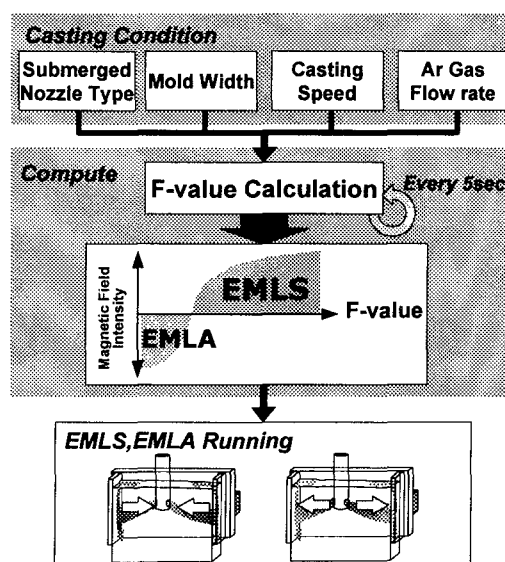


図7 EMLS, EMLAの自動制御システムのフロー図

# 論文審査結果の要旨

近年、鋼のスラブ連続 casting は2m/分を超える高速 casting となり、生産性が飛躍的に向上しているが、その一方で、モールドパウダーの溶鋼中への巻き込みによる介在物を起因とした製品の表面欠陥が増加し、その対策が急務となっている。本論文は、モールドパウダーの巻き込みを防止するための、鋳型内の溶鋼流動の定量化と、溶鋼流動の制御技術の開発を目的とし、高速 casting の条件においても介在物欠陥の少ない良好なスラブ品質を得るための技術改善と電磁力利用による新たな技術開発研究をまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と本研究の目的について述べている。

第2章ではモールドパウダーの巻き込み機構として、Kelvin-Helmholtz 不安定性と溶鋼表面の縦渦による2つの機構が重要であることを見出し、これらによる巻き込みを防止するためには溶鋼表面流速を限界値(0.32 m/s)以下に抑制する必要があることを明らかにした。

第3章では鋳型短辺近傍の溶鋼表面変動と溶鋼表面流速との関係に着目し、水モデル実験により両者の関係を明らかにするとともに、これまで実機の制御指標として用いられてきた、 casting 条件に基づくパラメータであるF値を介して、溶鋼表面変動の測定結果から溶鋼表面流速を推定する方法を確立した。

第4章では鋳型内溶鋼表面流速の直接測定を可能にする方法として、溶鋼中に耐火物棒を浸漬してその傾角または抗力を測定することにより溶鋼表面流速を求める2つの方法を確立した。

第5章では高速 casting 時のモールドパウダーの巻き込み、低速 casting 時の溶鋼表面の皮張りと Ar ガス気泡の局所的浮上によるモールドパウダー巻き込みを防止するために、移動磁界方式の鋳型内溶鋼流動制御装置を実機に適用し、スラブ表面品質の向上に顕著な効果を上げた。本方式は吐出流に制動力を与える EMLS と、吐出流に加速力を与える EMLA の両モードを有し、取鍋交換期の低速 casting 時および定常期の高速 casting 時のいずれにも対応でき、従来の静磁場による吐出流制動を凌駕する効果を有するものである。

第6章では鋳型内への溶鋼吐出流が左右不均等を生じる問題について、浸漬ノズル形状とスライディングノズル構造が及ぼす影響を水モデル実験により検討し、その機構を論ずるとともに、プール型形状よりも山型形状が、2層型鋳型幅方向開閉式よりも3層型鋳型厚み方向開閉式が上記の不均等を軽減することを明らかにした。

第7章では第5章で述べた EMLS および EMLA の溶鋼表面流に対する加減速機能を、実機において鋳型内溶鋼流動制御システムとして運用するための構成要件について検討し、溶鋼表面流速が0.23m/s以上で EMLS による減速を、0.12m/s以下で EMLA による加速を行うことが効果的であること、溶鋼流動制御の最適条件が鋳型幅方向の1/4幅位置で表面流速が0になる条件であることなどを明らかにした。

第8章では総括である。

以上要するに、本論文は鋼スラブの高速 casting 条件におけるモールドパウダーの巻き込みによる表面欠陥を防止するための様々な溶鋼流動制御法を開発し、その効果を水モデル実験および実機で確認するとともに、最適な流動制御条件を明確にしたものであり、高速連続 casting 技術の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。